

## 特集

## 核エネルギー利用技術の進歩

## 軽水炉技術の高度化(改良型PWR)

Sophistication of Light Water Reactor (Advanced Pressurized Water Reactor)

西村 健\*  
Takeshi Nishimura

## はじめに

我が国における加圧水型軽水炉による発電の歴史は、昭和45年に営業運転を開始した美浜1号機に始まり、現在では16基1260万kWが運転を行っている。しかしその運転初期においては、初期故障による稼働率の低下を経験した。このため徹底した不具合対策が電力会社並びにメーカーにとられるとともに、国の改良標準化計画にて検討され、運転中プラントに対策がとられ、かつ新設プラントの設計に反映された。

このような軽水炉の導入並びに改良の歴史を背景とし、真に日本の国情に合致した次世代の軽水炉として、第3次改良標準化計画の一環として、PWR 5 電力(北海道電力、関西電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電)と、三菱重工、ウェスチングハウス社との7社による国際協力体制の下に改良型PWRの開発が行われた。また、開発成果の重要部分について、国による大規模実証試験が行われた。

## 1. 開発の成果

開発は、昭和57年度から昭和61年度までの5年間にわたり、信頼性向上、安全性向上、運転性向上、保守性向上、経済性向上等をめざして行われた。開発にあたっては、これまでの原子力発電所の建設、運転を通じて得られた経験に基づく技術を集大成し、かつ抜本的改良を加え、開発された設計については、数多くの確証・実証試験により、信頼性、健全性に対する事前確認が行われた。

以下にこれらの開発の成果を述べる。

## 1.1 炉心設計

改良型PWRの炉心設計では、出力密度を下げることによる燃料の負担の軽減、炉心の中性子経済の改善によるウラン資源の節減並びに燃料費の低減をはかっ

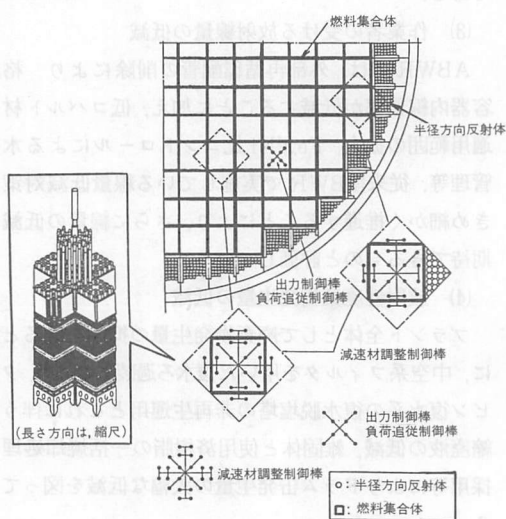


図-1 改良型PWR炉心断面図

ている。以下に、これらの特徴を簡単に説明する。

## ① スペクトルシフト方式

運転期間中の減速材調整制御棒の挿入・引抜き操作により、中性子エネルギースペクトルを変化させ、自己生成プルトニウムおよびウランウムの有効利用をはかる方式である。この方式の原理は、運転サイクル初・中期には、減速材調整制御棒を炉心深く挿入し、減速材/ウラン比率を小さくすることにより、中性子の減速を弱め中性子スペクトルをやや高エネルギー側にシフトさせ、ウラン238による共鳴吸収によってプルトニウムの生成を増加させる。運転後期には減速材調整制御棒を引抜き、減速材/ウラン比率を大きくすることにより、中性子の減速を強め中性子スペクトルを低エネルギー側にシフトさせ、プルトニウムおよびウランの燃焼を促進させるものである。

この方式の採用により、従来型PWRに比べ低濃縮度の燃料で長時間運転が可能である。

## ② 大型炉心(低出力密度炉心)

\* 関西電力(株)原子力建設部次長

〒530 大阪市北区中之島3-3-22

改良型PWRでは、炉心を大型化することにより、燃料の平均線出力密度を下げ、燃料にかかる負担を軽減している。

③ 半径方向反射体

半径方向反射体は、高速中性子反射効果の大きいステンレス鋼の丸棒をステンレス鋼の厚板で囲ったものを、炉心と炉心槽との間に多数設置し、炉心からの中性子の漏れを少なくする。これにより、炉心の中性子束分布を改善し中性子経済を向上すると共に、原子炉容器への中性子照射量を従来型PWRに比べ大幅に低減している。

1.2 炉内構造物

(1) 炉内構造物の特徴

① 制御棒案内管領域の改善

炉心上部に位置する制御棒案内管領域で、冷却材の流れを上昇流とし、各種制御棒を横流れから保護する設計とした。

② 原子炉容器下部プレナム容積の減少

従来型PWRの下部炉心板と、下部炉心支持板とを一体化した構造とし、下部プレナムの容積を減少することにより、1次冷却材喪失事故（LOCA）時の再

冠水時間の短縮をはかった。

③ ループシールの改善

長尺化した原子炉容器の中で炉心の位置を下げることにより、主冷却材管を全て炉心より上に配置し、LOCA時のループシールの問題を解消した。等である。

(2) 確証・実証試験

新設計の信頼性を確認するために、以下のような実証試験を実施した。

① 大型炉心確認試験

上部炉心構造物について、実機と流動的に相似な温度・圧力条件で流動試験を実施し、水力特性の把握、および流動振動に対する総合的な健全性確認を行った。

② 半径方向反射体流動試験

実尺の半径方向反射体および燃料集合体各一体を使用し流動試験を実施し、半径方向反射体の設置による炉心外周部の流動状況を確認し、反射体およびそれに隣接する燃料棒の流動振動に対する健全性を確認した。

③ 炉内構造物流動試験

原子炉容器および燃料集合体・半径方向反射体を含めた炉内構造物全体の1/5縮尺モデルを使用し、流動試験を実施し、炉内構造物全体としての流動振動に対する健全性を確認した。

④ 高温高压単一チャンネル流動試験およびPWR燃料高温高压流動試験

燃料集合体、制御棒および駆動装置等の新設計機器について実機条件下での流動試験を実施し、耐久性も含めた健全性・信頼性を確認した。

1.3 燃料集合体

従来型PWR燃料に対して実施されている信頼性向上対策の成果を取入れ、さらに装荷性・機械的信頼性の高い設計としている。

主な改良点は、

① 燃料棒曲がりの軽減

支持格子（グリッド）の段数を、従来の9段から10段に増加し、さらに、被覆管肉厚/被覆管外径比を増加させることによって、燃料棒曲がりの軽減をはかっている。また、被覆管肉厚/被覆管外径比の増加は、耐PCI性能向上にも寄与している。

② 支持格子の強化と装荷性の向上

支持格子コーナ部の機械強度ならびに滑りやすさの改良、および上下端支持格子のスカート構造により、燃料装荷・取出し時におけるグリッドの干渉による損傷の防止をはかり、さらにレグ方式の下部ノズルと下

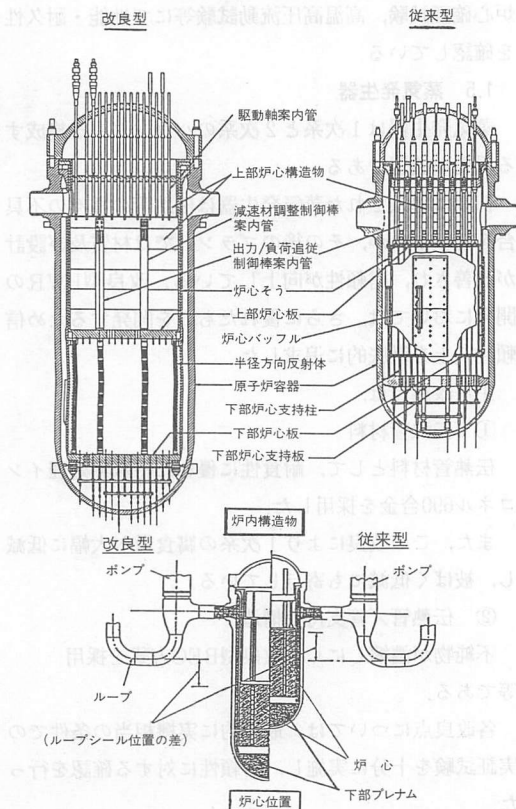


図2 改良型炉内構造物と従来型炉内構造物の比較

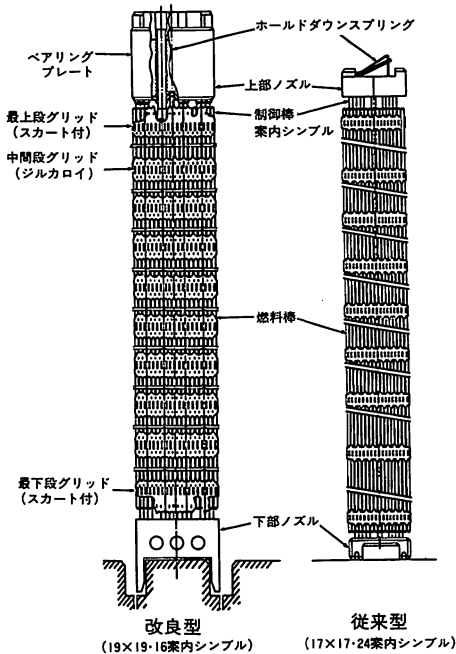


図-3 改良型PWR燃料と従来型PWR燃料の比較

部炉心板ガイド機構の改良により、装荷可能範囲を拡大し装荷性の向上をはかった設計としている。

### ③ 中性子経済の改善

燃料集合体の中間グリッド材料に、中性子吸収の少ないジルカロイを採用することによって中性子経済の改善をはかっている。等である。

上記の改良を施した燃料集合体にたいし、実機条件を模擬した高温高圧流動試験（実寸大模擬燃料、減速材調整制御棒を使用）、制御棒落下試験（地震時およびLOCA時の原子炉停止機能の確認）等の実証試験を実施した。

#### 1.4 制御棒および駆動装置

改良型PWRの制御棒には、出力制御棒の他に負荷追従運転用の負荷追従制御棒、スペクトルシフト用の減速材調整制御棒の3種類の制御棒がある。

出力および負荷追従制御棒クラスは、太径8ロッド十字型とし、減速材調整制御棒クラスは、太径24ロッドが5体の燃料集合体にまたがって挿入される方式としている。

出力制御棒は、銀-インジウム-カドミウム（Ag-In-Cd）にかえて、ボロンカーバイド（B<sub>4</sub>C）を使用することとしたが、中性子吸収によるB<sub>4</sub>Cの劣化をおさえるために、常時炉心に挿入されている制御棒先端

部にはAg-In-Cdを用いることとし、ステンレス製被覆管にB<sub>4</sub>CとAg-In-Cdとのハイブリッド方式の吸収材を納めた構造とした。また駆動装置は、ラッチアセンブリに2重歯先ラッチアームを採用し、耐久性の向上をはかっている。

原子力発電の比率の増大に伴う運転自由度拡大対応として、負荷追従運転性能を向上させるために、通常の制御棒に比べ中性子吸収が弱く、かつ中性子照射に対しても耐久性のある、ステンレス被覆管にジルカロイペレットを納めた設計の、負荷追従制御棒を採用している。駆動装置には、出力制御棒駆動装置と同じものを採用してある。

減速材調整制御棒は、炉心内で減速材を排除しプルトニウムの生成を促進させるために、中性子吸収の少ないジルカロイ被覆管にジルカロイペレットを納めた構造を採用している。駆動装置は、全挿入または全引抜きの2位置制御のみに使用されること、およびスペース的に制約を受ける原子炉容器蓋の上部に取り付けられることを考慮し、部品数が少なくかつ小型である水压駆動ピストン方式としている。

これらの制御棒および駆動装置は、先に述べた大型炉心確認試験、高温高圧流動試験等にて性能・耐久性を確認している。

#### 1.5 蒸気発生器

蒸気発生器は1次系と2次系のバウンダリを構成する重要な機器である。

初期に導入された蒸気発生器は伝熱管の種々の不具合を経験したが、その後のプラントでは材質及び設計が改善され、信頼性が向上している。改良型PWRの開発においては、さらに優れたものを開発するため信頼性向上を徹底的に追求した。

主な改良点は、

##### ① 伝熱管材料

伝熱管材料として、耐食性に優れた特殊熱処理インコネル690合金を採用した。

また、この改良により1次系の腐食量が大幅に低減し、被ばく低減にも寄与している。

##### ② 伝熱管/管支持板構造

不純物が濃縮しにくい改良型BEC方式を採用。等である。

各改良点については、最終的に実機相当の条件での実証試験を十分に実施し、信頼性に対する確認を行った。

以下に具体的な確認・実証試験項目について述べる。

① 蒸気発生器伝熱管開発試験

特殊熱処理インコネル600合金、特殊熱処理インコネル690合金、インコロイ800合金等の候補材について、伝熱管外面に対してSCC（応力腐食割れ）、減肉腐食、孔食、IGA（粒界腐食損傷）等に対する耐食性を試験によって確認した。その結果、特殊熱処理インコネル690合金が各種腐食に対しより優れた耐食性を有していることを確認した。

なおこの成果を反映して、現在建設中の大飯3・4号機の蒸気発生器伝熱管材料にこの特殊熱処理インコネル690合金を採用している。

② 蒸気発生器管支持板部開発試験

管支持板部の候補として、グリッド型・改良BEC型等について支持板部での不純物濃縮試験を実施し、改良BEC型が優れていることを確認した。

③ 10MWモデルボイラ試験

最終的な実証試験として、蒸気発生器全体としての圧損、流動特性および伝熱特性を確認するために、実機相当の条件での10MWモデルボイラ試験を実施し、設計の妥当性を実証した。

1.6 工学的安全防護設備

改良型PWRにおける特徴的な工学的安全防護設備として、1次系安全防護設備がある。

1次系安全防護設備は、従来型PWRの安全注入設備、余熱除去設備および格納容器スプレイ設備を統合再編成し、システムを基本的に見直すことにより、安全性向上をはかっている。その主な特徴を次に述べる。

① 安全系補機の4サブシステム化

安全系補機を、従来の100%×2系列から50%×4系列とする4サブシステムを採用することにより多重性/独立性の強化をはかり信頼性を向上させるとともに、系統構成の簡素化をはかっている。

② 緊急注水用水タンクの格納容器内設置

格納容器内底部に緊急注水用水タンクを設置し、安全防護系ポンプの水源とすることにより、事故後の再循環切替を不要とし、運転員操作の軽減、信頼性の向上をはかっている。

③ 格納容器再循環空調装置の高機能化

通常時格納容器の冷却に使用している格納容器再循環空調装置を、事故時の格納容器冷却にも使用可能な設計とすることにより、小破断LOCA時に格納容器スプレイを作動させなくてもよいようにしている。

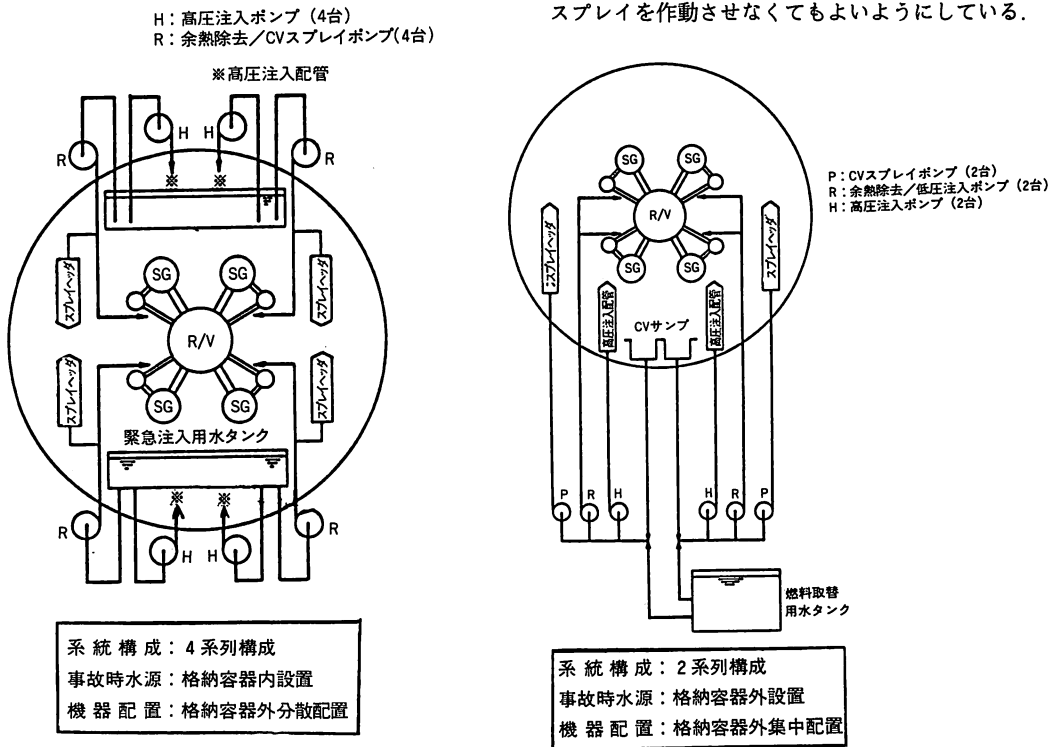


図-4 改良型PWR安全防護設備と従来型PWR安全防護設備の比較

次に、改良型PWRの安全評価について以下に述べる。

まずLOCAについて、改良型PWRの様相は、従来型PWRと若干異なる。

大破断LOCAにおいては、原子炉容器を長尺化したことによる出入口ノズルから炉心までの水頭差の増大、下部プレナム容積の減少による再冠水時間の減少等により、再冠水ピーク温度を低下することができた。また小破断LOCAについては、1次冷却設備の構造の改良によるループシールの改善等により、従来型PWRに比べ燃料被覆管温度を大幅に低くすることができた。

また、その他の事象については、従来型PWRと比較しても事象の様相に大差なく、問題のないことを確認している。

### 1.7 タービン発電機設備

#### (1) 52インチ翼低圧タービン

タービン発電機設備については、原子炉系との協調をはかり、信頼性、運転性、経済性の観点から総合評価を行い、低圧タービン最終翼が52インチ翼のTC 6 F52型としている。

52インチ翼は、1350MW級タービンに最適な低圧最終翼として開発されたものであり、改良型PWRユニットの熱効率向上と、それに伴う発電端出力の増大に大きく寄与している。

また、52インチ翼の開発にあたっては、実翼を1列分試作しロータに植え、組み立てた状態で回転振動試験を実施し十分な信頼性を有していることを確認している。

#### (2) 発電機

発電機については、従来4ループプラント1180MW級と同一思想に基づき、鉄心長さを増加することで容量増加に対応する計画である。

また発電機用励磁機は、建設中4ループプラントと同様に高性能ダイオードを使用し、回転整流器を簡素化したブラシレス励磁機とすることとしている。

### 1.8 計測制御設備

改良型PWRでは、今後より一層多様化するであろう機能要求等に応えるために、保護系・制御系ともにマイクロコンピュータ化し、多重伝送技術を全面的に採用することとしている。

これにより、次のような効果が期待できる。

- ・原子炉誤トリップにいたるような故障の発生頻度の低減

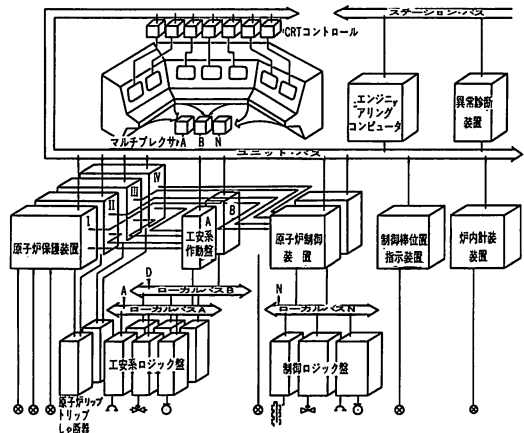


図-5 計測制御設備全体システム構造図

- ・多様な運転モードに容易に対応可能
- ・定期試験を自動化とし、保守性を大幅に向上
- ・自己診断機能による信頼性の向上

#### (1) 原子炉保護系

原子炉保護系のマイクロコンピュータ化により、燃料の健全性を監視する目的を持つ従来の過大温度 $\Delta T$ および過大出力 $\Delta T$ 保護機能に代えて、限界熱流束比(DNBR)および線出力密度の直接演算を行い、演算精度向上にともなう運転余裕の増大をはかっている。

さらに、信号伝送系には、外部ノイズの影響を受けない光ファイバを大幅に適用する計画である。

#### (2) 原子炉制御系

信頼性向上の観点から、主要制御系を適切なグループに分散し、各グループを2重化待機冗長方式としている。さらに、制御装置の故障により原子炉が誤トリップする可能性のある制御系について、検出器から制御・演算回路までを多重化構成としている。

また、マイクロコンピュータの自己診断機能により故障修復の容易化や自動試験装置の導入により保守性の向上をはかるとともに、自動化範囲の拡大により運転員の負担軽減や潜在的なヒューマンエラー防止をはかるとしている。

#### (3) 中央制御盤

盤配列は、現在建設中の最新プラントと同様に、CRTを主体とした制御盤としている。

CRT画面設計には、情報の読み誤りを防止するため、視認距離、座位、立位からの視認角度等による視認性、照明とのコントラストおよび疲労を考慮した色彩・形状等を考慮し、人間工学的設計手法を取り入れた表示形態としている。また、表示情報については、

プラントシステムおよび機器の各々のレベルで階層化するとともに、関連情報をグループ化し同一画面へ集約表示して、プラント状況の把握・事象の的確な判断を容易にし、トレンド表示等により状態変化の認知が容易なようにしている。

また、バックアップ機能を設けることにより、CRTの故障時にも当該CRT画面を隣接したCRTに表示する等、CRTプロセッサの故障によってプラントの監視機能が喪失しないようにしている。

一方、事故時の警報多発による運転員のストレスの軽減、異常事象の状況に応じた警報の階層別表示による誤操作防止、知識工学に基づく対話型操作ガイダンス、インストラクションシステム等の運転支援技術を適切に統合させ、運転員にとって使いやすく信頼性の高いシステムとする計画である。

### 1.9 配置設計

原子力プラントの設備設計と配置設計とは表裏一体をなすものであり、炉心、機器、系統の開発と併せて配置設計を進め、原子力発電所の信頼性をより一層高めるとともに、運転員の負担を軽減した、安全で使いやすい機器配置とした。

配置設計の特徴は次のとおりである。

#### ① 安全系補機配置

改良型PWRで開発された安全系の特徴を最大限に生かして、安全系ポンプ室を格納容器周囲の4象限に効率的に配置し、緊急注入用水タンクの格納容器内設置と相まって建屋内スペースの有効利用をはかった。

#### ② 被ばく低減・定検短縮

蒸気発生器室内遮蔽壁の設置、マルチプルスタッドテンションナを考慮した設計、パーマネントキャパティシールの採用等により、被ばく低減、定検短縮(40日)を達成した。

#### ③ タービンプラント配置

4段の低圧給水加熱器を復水器中間部に設置し、タービン建屋容積および復水管、抽気管等の合理化をはかった。

#### ④ 3次元CADによる配置設計

従来のエンジニアリングモデルに替わり3次元CADを用いることにより、配置設計の柔軟性を増すとともに、容易に運転・保守性の検証が行えるようにした。

## 2. プラント総合

### (1) 信頼性評価

改良型PWRでは、抜本的な改良を加えた原子炉であるので、新設計機器、系統について部品レベルに至るまで、発生しうる故障モード、故障原因ならびに確証・実証試験等により達成される確証度をFMEA手法により総合的に評価し、必要な場合は設計改善への反映を行った。

### (2) 被ばく評価

プラント配置の改善・遠隔操作技術の活用・材料の選択等を含む被ばく低減対策をとることによって、総被ばく線量として、0.33人・シーベルト/炉・年以下が達成可能となった。

主要な対策項目を以下に示す。

- ・放射線源の減少 : 蒸気発生器伝熱管材料の改良
- ・遮蔽の強化 : ループ室内区画壁の採用
- ・遠隔操作機器の活用 : ロボットの活用
- ・作業性の改善 : 3次元CADによる作業性の検証

## おわりに

改良型PWRの開発は、我が国の軽水炉技術の開発においてこれまでにない大型プロジェクトであったが、国、電力会社およびメーカーが一体となり、しかも国際協力体制の下で、関係者のなみなみならぬ努力により、5年にわたる開発を無事終了し、当初の開発目的を達成することができた。今後は、昨今のエネルギー事情の見通し、チェルノブイル事故以降の安全確保の重要性に関する再認識等原子力を取り巻く情勢に鑑み、開発での成果を踏まえ、より一層の高度化をはかっている所存である。